

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



Estudio sobre la influencia de la aplicación de biocarbón en las propiedades del concreto

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL

AUTOR

Jose Giancarlo Salvador Terrones

ASESOR

Ronald Esteban Villanueva Maguiña

<https://orcid.org/0000-0002-3707-5503>

Chiclayo, 2023

Articulo_salvador

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

6%

2

tesis.usat.edu.pe

Fuente de Internet

2%

3

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

2%

4

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

2%

5

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

1%

6

repositorio.usanpedro.edu.pe

Fuente de Internet

1%

7

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

8

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1%

9

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1%

Índice

Resumen	4
Abstract	5
Introducción.....	6
Revisión de literatura.....	8
Antecedentes del problema.....	8
Bases teórico-científicas	10
Materiales y métodos	12
Tipo de estudio y diseño de contrastación de hipótesis.....	12
Hipótesis	12
Variables – Operacionalización	12
Población, muestra de estudio y muestreo	13
Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	14
Procesamiento para análisis de datos	14
Criterio de selección.....	14
Resultados y discusión	19
Conclusiones	29
Recomendaciones	31
Referencias.....	32

Resumen

La industria productora de cemento es una de las grandes emisoras de dióxido de carbono (CO₂), lo que genera un grave problema medioambiental. Por lo tanto, en este estudio se está optando como alternativa de solución el uso del biocarbon de restos de madera en la producción del concreto. El objetivo de este estudio es aumentar las características de resistencia del concreto, usando el biocarbón como sustitución parcial del cemento en niveles de 1%, 2% y 2.5% en peso. Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión, flexión, y fisuración bajo condiciones de curado húmedo y curado al aire libre a edades de 7, 14, 28 y 56 días. El concreto con biocarbón arrojó una mejora de 8.17% y 16.88% en la resistencia a compresión a los 28 días a niveles de sustitución del 1% y 2%, respectivamente. A los 56 días se mostró una mejora de 13.73% y 18.43% en la resistencia a compresión a niveles de sustitución del 1% y 2%, respectivamente. Cabe aclarar que estas mejoras fueron con curado húmedo del concreto. Las resistencias a compresión con curado al aire libre mejoraron con respecto a la muestra patrón, sin embargo, no superaron la resistencia requerida de f'_c 210 kg/cm². Con respecto al módulo de rotura, es decir, la resistencia a flexión fue relativamente baja con respecto a la muestra patrón.

Palabras clave: Biocarbón, Pirólisis, Concreto, Propiedades mecánicas

Abstract

The cement production industry is one of the largest emitters of carbon dioxide (CO₂), which creates a serious environmental problem. Therefore, in this study, the use of biochar from wood remains in the production of concrete is being chosen as an alternative solution. The objective of this study is to increase the resistance characteristics of concrete, using biochar as a partial substitution of cement at levels of 1%, 2% and 2.5% by weight. Compressive, flexural, and cracking strength tests were carried out under moist curing and outdoor curing conditions at ages of 7, 14, 28, and 56 days. Biochar-containing concrete yielded an 8.17% and 16.88% improvement in compressive strength at 28 days at 1% and 2% substitution levels, respectively. At 56 days, an improvement of 13.73% and 18.43% in compressive strength was shown at substitution levels of 1% and 2%, respectively. It should be noted that these improvements were with moist curing of the concrete. The compressive strengths with curing in the open air improved with respect to the standard sample, however, they did not exceed the required resistance of f'_c 210 kg/cm². Regarding the modulus of rupture, that is, the flexural resistance was relatively low with respect to the standard sample.

Keywords: Biochar, Pyrolysis, Concrete, Mechanical properties

Introducción

La construcción es una industria que funciona a nivel internacional, siendo el concreto aquella mezcla de grava, arena, cemento, agua y aire; el material más usado en la elaboración de carreteras, puentes, viviendas, edificios y diversas edificaciones; sin embargo, para la producción del concreto es necesario obtener un material muy importante que se extrae y fabrica a nivel mundial, la cual es el cemento, este puede afectar a millones de personas e incluso al mismo medio ambiente; debido a la extracción y quemado de los minerales como la arcilla y la caliza.

El incremento de habitantes en todo el mundo conlleva a la construcción de nuevas edificaciones, ya sea para formar nuevas ciudades o expandirlas [1]. Por ende, se necesitará una vasta cantidad de cemento, convirtiéndose en un problema muy serio debido a las emisiones grandes de dióxido de carbono (CO₂), gracias a la producción de este material, incluso se estima que se libera una tonelada CO₂ al medio ambiente durante la fabricación de una tonelada de cemento portland [2]. Precisamente en el 2020 la producción de cemento fue de 0.59 ton de CO₂/ton de cemento, y la elaboración se incrementó 1,5% entre 2015 y 2021. Y para tratar de encaminarse al escenario de emisiones netas a cero hasta el 2050 es necesario reducir el 3% hasta el 2030 [3].

Las grandes cantidades de cemento que se han venido usando ha incitado a muchos investigadores a optar por otras alternativas con tal de reducir la explotación de las materias primas y la emisión de los gases de efecto invernadero; una de las opciones es disminuir la relación Clinker-cemento, otra opción es tratar de reemplazar los minerales que se usan en la elaboración del cemento e incluso materiales que puedan ser más sostenibles y ecológicos [4]–[6]. Un claro ejemplo es el uso del biocarbón como adición o sustitución parcial del cemento.

El biocarbón es un material poroso, orgánico y alto en carbono, que se elabora mediante la pirolisis (degradación por calor de una materia orgánica en ausencia de aire) o carbonización de residuos de biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas y forestales [7]–[9].

El biocarbón tiene diversas aplicaciones, como mejorar la calidad del suelo, la eliminación de contaminantes del agua, y la reducción de CO₂. Además, su producción promueve a la gestión sostenible de desechos orgánicos y la generación de energía renovable. En resumen, el biocarbón es un material sostenible y multifuncional que tiene un gran potencial para contribuir a la transición de una economía circular y poca en carbono [10], [11].

El uso de biocarbón en la producción de concreto tiene varias ventajas que lo simplifican en una alternativa prometedora y sostenible, entre ellas está el bajo costo de producción [12], un

posible uso más amplio y con respecto a las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas se pueden explorar resultados favorables para el uso de este novedoso material [13], [14].

Rescatemos que el biocarbón al ser un material fácil de producir a partir de cualquier materia orgánica puede considerarse multifuncional, teniendo el potencial de minimizar gases de efecto invernadero y secuestrar carbono [15], El biocarbón puede mejorar las propiedades de desempeño del cemento al tener características como baja densidad aparente y baja conductividad térmica, además de tener una naturaleza porosa que presenta múltiples ventajas para los materiales de construcción [16].

En la actual investigación se empleó el biocarbon de restos de madera (Molle costeño, molle serrano, árbol de meijo, árbol de ficus y árbol de tulipan), ya que este producto se ha venido investigando en diferentes campos, inicialmente se basaron en la agricultura y silvicultura; aunque actualmente hay trabajos de investigación demostrando el uso beneficioso que proporciona el biocarbon hacia el concreto, sin embargo, es dificultoso llegar a un adecuado diseño de mezcla que sea universal en el concreto, esto se debe a las propiedades principales del biocarbon, estas pueden ser muy variables ya que esto depende del tipo de materia prima que se producirá dicho material y las condiciones de producción.

El biocarbon puede ser utilizado con el propósito de economizar los costos de materiales para la construcción, el enfoque de este estudio es sustituir parcialmente el cemento por distintas dosificaciones (1%, 2% y 2.5% del peso del cemento) de biocarbón producto de la pirolisis de restos de madera, así mismo, determinar las fuerzas de compresión y flexión del concreto con cada diseño de mezcla respetando los porcentajes de biocarbon de restos de madera que se sustituirán por el cemento. Las muestras tuvieron dos tipos de curado, un curado húmedo y curado al aire libre, y las edades ensayadas fueron a los 7, 14, 28 y 56 días.

Revisión de literatura

Antecedentes del problema

En la actualidad se vienen investigando distintas formas de mejorar las propiedades del concreto, así mismo, tratar de reducir la abundante producción de cemento sustituyéndola con otros materiales.

Por consiguiente, se presentan antecedentes asociados al tema: ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE BIOCARBÓN EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO:

Song, Li, Wang, Guo Li (2023) [17] en su investigación, estudiaron el uso del biocarbón producido a partir de la pirólisis de cascaras de arroz como aditivo para hormigón celular (concreto de baja densidad y alta capacidad absorbente). La fabricación del biocarbon se produjo a 300, 500 y 700 °C con porcentajes de reemplazo del 1%, 3%, 5% y 7%. Los resultados mostraron el de biocarbón mejoró significativamente la resistencia mecánica del hormigón celular, especialmente para la muestra que fue expuesta a 700°C con una tasa de mejora del 5%. Además, el biocarbón poroso mejoró la hidratación del cemento y la estructura porosa del hormigón celular, lo que resultó en una mayor resistencia al ambiente húmedo y a la contracción.

Roychanda, Lia, Lyncha, Saberiana, Zhua, Youssfb, Ngo (2023) [18], se basaron en potenciar las características mecánicas del concreto usando como ventaja una de las propiedades que posee el biocarbon, ya que gracias a la a los poros que se generan al estar en contacto con el cemento y los agregados este puede absorber el agua y beneficiar en la resistencia del concreto. En este caso el acto pirolítico realizado fue de residuos orgánicos (madera), así mismo, el autor reemplazo el 10%, 20% y 30% en volumen por el agregado fino. El concreto que contiene biocarbón aumento la resistencia a compresión el 63,9%, 45,6%, y 9,6% en los resultados de 7 días, con niveles de sustitución del 10%, 20% y 30%, respectivamente. A los 28 días, las muestras de concreto con biocarbón, aumentaron el 20,1%, 22,6% y 16%, con porcentajes de sustitución del 10%, 20% y 30%, respectivamente. Así mismo, aplicaron un curado del concreto en un entorno de dióxido de carbono (CO₂); y el resultado fue que, el concreto mezclado con biocarbon de madera para una dosificación del 10% de reemplazo por agregado fino mostro una mejora a compresión del 24,7% y 37,3% a los 7 y 28 días respectivamente a comparación de su muestra patrón.

En el estudio realizado por Alia, Agarwala, Hanifaa, Rawata, Paswana, Raib, Tyagic, Naika, Pippal (2023) [19], se exploró las alternativas que otorgaba el biocarbon hecho de aserrín, específicamente desechos de biomasa del sector de la madera (aserrín), recolectados del país de la India. El método de pirolisis usado fue lenta a unos 500°C, además, uso tres dosificaciones del 1%, 3% y 5 % de reemplazo por cemento en peso. Los resultados indican que el biocarbón contribuyó a mejorar los compuestos cementosos y los productos de hidratación. En particular, después de 28 días, se demostró un incremento en la resistencia a compresión al reemplazar el 1 %, el 3 % y el 5 % en peso con biocarbón aumentando un 20,6%, 45,2% y 28% respectivamente, en comparación al grupo de control.

Gupta & Kua (2018) [20], investigaron varias alternativas de solución para reducir los subproductos generados por la industria de fabricación de muebles en forma de partículas finas de madera como aserrín, así mismo, el aserrín también puede afectar la salud humana, ya que contiene partículas que se transmiten por el aire causando problemas respiratorios. Los estudios realizados en esta investigación fue la adición de biocarbon de aserrín previamente saturado (2% en peso de cemento) para que determine la resistencia y permeabilidad del concreto sometido a condiciones de curado húmedo y curado al aire. Además, el biocarbón se preparó a una temperatura de pirolisis de 300°C y 500°C. Como resultados, los autores obtuvieron que la resistencia a compresión aumento entre un 40% y 50% mayor a los 28 días en comparación que el concreto convencional, especialmente en condiciones de curado al aire libre, también obtuvieron aumentos de resistencia similares con respecto a la flexión y tracción, esto se debe a la baja relación a/c inicial en las mezclas con biocarbon que fueron previamente saturadas. Con respecto a la porosidad, la accesibilidad del agua se redujo entre un 18% y un 20%, lo que resulto en una reducción de la sorción (proceso en la que un material es absorbido por otro) y la profundidad de penetración del agua en un 55% y 60%.

Bases teórico-científicas

Propiedades y producción del biocarbón

El biocarbón es el residuo sólido obtenido de la descomposición térmica controlada (pirólisis) de materia orgánica o biomasa (madera, desechos animales y vegetales) en un ambiente bajo oxígeno limitado. El procedimiento anaeróbico también llamado pirólisis que transforma la biomasa residual en un material carbonoso que se caracteriza por tener una microestructura porosa, y su resistencia a la degradación es considerablemente mayor en cuanto al material de origen [21].

Como resultado, de la descomposición térmica de la materia prima original son: sustancias gaseosas (que se puede utilizar para la producción de energía), bio-aceites líquidos (podrían usarse para la producción de combustibles y productos químicos) y carbón sólido, cuya proporción depende de las condiciones en que se realiza la pirólisis.

Según Bridgwater [22] la pirólisis puede clasificarse según la temperatura en la que se está quemando la materia prima, el tiempo en que residen y la proporción de los productos finales, se explica en la siguiente tabla:

Tabla 1: Tipo de pirólisis según las condiciones de procesos y productos

Tipo de Pirólisis	Temperatura	Tiempo de estancia	Porcentaje en peso del producto (%)		
			Sólido	Líquido	Gaseoso
Pirólisis lento	300-500°C	> 10 min	35	30	35
Pirólisis Intermedio	400-500°C	≈ 10-30 s	25	50	25
Pirólisis Rápida	400-650°C	≈ 1-5 s	12	75	13
Pirólisis muy rápida	700-1000°C	< 0.5 s	10	5	85

Fuente: [23]

Como se puede observar, la proporción más alta de carbón sólido se asocia a una pirólisis lenta o intermedia.

Para que se realice una buena producción de biocarbón se requiere de una amplia gama de materia orgánica en la que debe pasar por un proceso de pirólisis, por lo tanto, la estructura original y la composición de la fuente de biomasa se consideran factores predominantes que establecen la microestructura y otras características físicas del producto final (biocarbon). Aun

cuando el proceso de pirólisis está relacionado con una mayor pérdida de masa y la reducción de volumen, el carbono y el esqueleto mineral del biocarbón aún mantiene la estructura fundamental y la porosidad del material [24].

Generalmente la temperatura es aquella que define cuales sería los cambios físicos de la biomasa (descomposición térmica, liberación de compuestos volátiles y la siguiente formación de microestructuras), el tratamiento más alto de temperatura se consideró como el factor más influyente en el proceso de pirólisis, en comparación con la velocidad de calentamiento, el tiempo de calcinación, etc. Según Barissov (2021) [23], se hizo un estudio que, a mayor temperatura mediante el proceso de pirólisis, se incrementa la formación de poros en las muestras de biocarbón, y un mayor contenido de carbono.

Concreto

Una La mezcla de cemento, agua y aditivos (como arena, grava y piedra triturada) se denomina concreto. El concreto es un material de construcción que se endurece con el tiempo debido a una reacción química conocida como hidratación. Este material es duradero y resistente que se utiliza en una amplia gama de aplicaciones de construcción, desde edificios y puentes hasta carreteras y áreas de almacenamiento, es un material de construcción muy flexible que se puede personalizar para satisfacer una amplia gama de necesidades de construcción en términos de resistencia, durabilidad, estética y otros factores [25].

Materiales y métodos

Tipo de estudio y diseño de contrastación de hipótesis

Tipo de estudio:

El método de investigación utilizado en este estudio científico es del tipo experimental ya que se puede manipular deliberadamente la variable independiente (biocarbón), para luego observar el efecto que tiene sobre la variable dependiente.

Diseño de contrastación de hipótesis:

- De acuerdo con el resultado deseado, es aplicada ya que tiene como objetivo proporcionar una solución a un problema específico a partir de la información recopilada.

Hipótesis

La sustitución parcial del cemento por biocarbón de restos de madera en diferentes dosificaciones (1%, 2% y 2.5% del peso del cemento) pueden mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto f_c de 210 kg/cm².

Variables – Operacionalización

A continuación, se indican las variables dependientes e independientes, incluido su operacionalización:

Tabla 2: Variable independiente

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR
Biocarbón (Independiente)	Componentes químicos	Fluorescencia de rayos X
	Proporciones de biocarbón	<ul style="list-style-type: none"> – 1% en peso del cemento. – 2% en peso del cemento. – 2.5% en peso del cemento.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3: Variables dependientes

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR
Propiedades del concreto (Dependiente)	Concreto en estado fresco	Asentamiento (Slump)
		Exudación
	Concreto en estado endurecido	Resistencia a la compresión
		Resistencia a la flexión
		Fisuración del concreto

Fuente: Elaboración propia

Población, muestra de estudio y muestreo

Población

En esta investigación experimental de concreto con biocarbón, la población estaría compuesta por el conjunto de muestras de concreto en las cuales se aplicará la sustitución parcial del cemento por biocarbón. Estas muestras son los especímenes de concretos preparados y utilizados para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material.

Muestra

Está formado por las vigas y probetas cilíndricas de concreto con un $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ fabricado de materia prima como agregados finos, agregados gruesos, cemento, agua y biocarbón.

Muestreo

El tipo de muestreo será no probabilístico, y el número total de muestras que se ensayaron es de 128, dividiéndose en 80 probetas cilíndricas y 48 vigas. Las probetas se descomponen en tres ensayos, las cuales son: ensayo de compresión con 72 probetas (48 probetas expuesto a curado húmedo y 24 probetas a curado al aire libre) y ensayo de fisuración (se dimensionarán moldes de acuerdo con la norma ASTM C 1579).

Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 4: Método, técnica e instrumento

MÉTODOS	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Método experimental	Análisis granulométrico de los agregados (Según NTP 400.012)	Formatos de laboratorio, balanzas, hornos, tamices normalizados, moldes, probetas, cono de Abrams, varilla lisa, compactadoras, máquina de compresión, etc.
	Asentamiento (SLUMP) (Según NTP 339.035)	
	Exudación (Según NTP 339.077)	
	Resistencia a compresión (Según NTP 339.034)	
	Resistencia a flexión (Según NTP 339.078)	
	Fisuración (Norma ASTM C 1579)	

Fuente: Elaboración propia

Procesamiento para análisis de datos

Para analizar los resultados obtenidos en laboratorio se usó el software Excel ya que, a través de sus múltiples herramientas, permite sintetizar la información de manera eficaz, además, se usó la información recopilada de distintos investigadores que se asemejan a nuestro estudio.

Criterio de selección

Selección del biocarbón

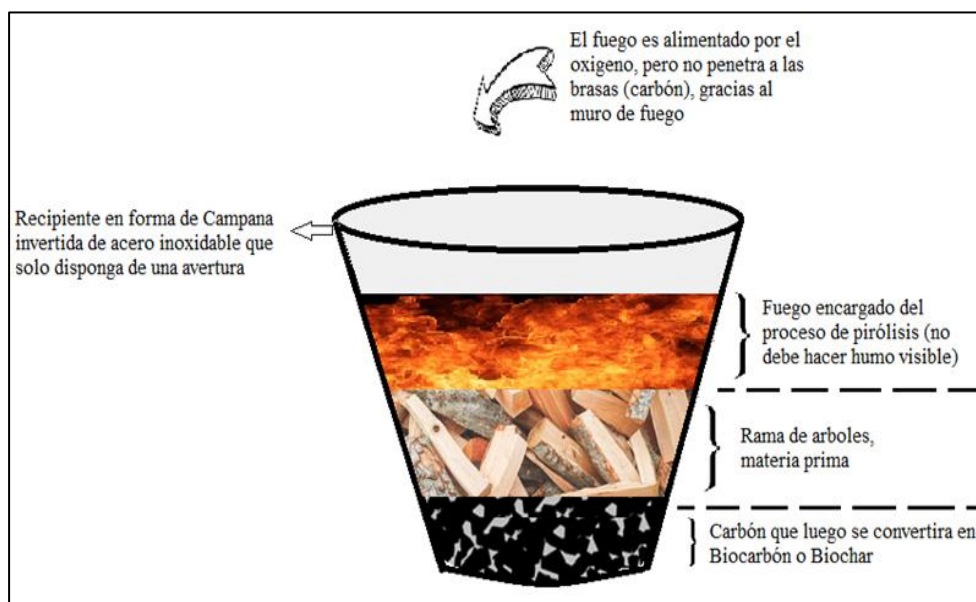
Inicialmente se recolectan las ramas de los árboles (Molle costeño, molle serrano, árbol de meijo, árbol de ficus y árbol de tulipan), para su posterior almacenamiento y secado al aire libre. En este caso el horno pirolítico tiene una forma de campana invertida (Fig. 1), una vez seca las ramas, se introducen residuos pequeños de madera, para luego encender el horno. El proceso de pirólisis se detalla más a fondo en la Fig. 2. Una vez encendido el horno se procede a adicionar ramas, con el fin de obtener brasas de carbón, el horno está a una temperatura aproximada de 500°C. Una vez convertido en brasa todo el biocarbón se almacena para su posterior enfriamiento.

Figura 1: Horno pirolítico junto a las ramas secas



Fuente: Elaboración propia

Figura 2: Proceso pirolítico del biocarbón



Fuente: Elaboración propia

Una vez recolectado el biocarbón, se procedió a moler el con un molino manual. Posteriormente se secó el biocarbón molido en un horno a una temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un tiempo determinado de 24 horas. Posteriormente se sacó el biocarbón del horno se dejó reposar para que se enfríe, posteriormente se puede observar en la Fig. 3 que se pasó por la malla número 50 (0.3 mm) para uniformizar las partículas de biocarbón molidas, se realizó esta acción ya que las mallas más inferiores tenían una abertura demasiado pequeña y al pasar por dichas mallas se desperdiciaba mucho biocarbón o no pasaba la suficiente cantidad necesaria para los ensayos requeridos.

Figura 3: Tamizado del biocarbon de madera



Figura 4: Biocarbón tamizado antes de pasar al horno para el secado



Fuente: Elaboración propia

Composición física y química del cemento

Se empleó el cemento Portland tipo I en todas las muestras sometidas a ensayo, y las especificaciones correspondientes se encuentran detallados en la tabla 2 y tabla 3. En este estudio se utilizaron tres porcentajes biocarbon: 1%, 2% y 2,5% en peso.

Tabla 1. Propiedades físicas del cemento.

Superficie específica	Expansión en autoclave	Densidad	Tiempo de fraguado	
			Inicial	Final
4030 cm ² /g	0.05 %	3.11 g/cm ²	109 min	230 min

Tabla 2. Propiedades químicas del cemento.

MgO	SO ₃	Pérdida por ignición	Residuo insoluble
2.0 %	2.8 %	2.8 %	0.6 %

Composición química del biocarbón

En esta investigación se usaron 3 porcentajes de biocarbon, de 1%, 2% y 2,5% en peso. Además, se realizó un estudio de composición química, para este análisis se utilizó un equipo espectrómetro de fluorescencia de rayos x de energía dispersiva. Shimadzu, EDX 800HS. La composición química del biocarbón derivada de restos de madera se presenta en la tabla 3 y tabla 4. Es importante destacar que este análisis se llevó a cabo en el laboratorio Labicer, perteneciente a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Tabla 3. Análisis de composición química elemental.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)
Calcio, Ca	61.937
Potasio, K	21.285
Magnesio, Mg	8.007
Azufre, S	2.238
Fósforo, P	2.175
Hierro, Fe	1.683
Silicio, Si	1.171
Terbio, Tb	0.0428
Estroncio, Sr	0.0428
Cinc, Zn	0.242
Cobre, Cu	0.171
Manganeso, Mn	0.153
Rubidio, Rb	0.081

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Análisis de composición química expresado en óxidos.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)
Óxido de calcio, CaO	60.217
Óxido de potasio, K ₂ O	19.023
Óxido de Magnesio, MgO	7.290
Óxido de azufre, SO ₃	4.554
Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	3.878
Óxido de silicio, SiO ₂	2.132
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	1.607
Óxido de estroncio, SrO	0.384
Óxido de terbio, Tb ₄ O ₇	0.359
Óxido de cinc, ZnO	0.209
Óxido de cobre, CuO	0.147
Óxido de manganeso, MnO	0.133
Óxido de rubidio, Rb ₂ O	0.066

Fuente: Elaboración propia

Diseño de mezcla

La tabla 5 muestra el esquema de mezcla utilizado en las pruebas del concreto patrón y en la tabla 6 se muestra la dosificación de la mezcla con biocarbón. La relación agua cemento se mantuvo constante en 0.552 para todas las muestras y así garantizar que todas las muestras incluido la muestra patrón y las dosificaciones estén en la misma condición.

Con relación a las dosificaciones de biocarbón, se emplearon tres variantes distintas en porcentajes del 1%, 2% y 2.5% en peso. Estas dosificaciones fueron seleccionadas con el objetivo de determinar cuál de ellas resulta óptima y contribuir a mejorar las propiedades mecánicas del concreto tanto en su estado fresco como endurecido. Los materiales se mezclaron en un orden específico para asegurar una distribución homogénea: primero se agregaron los agregados finos y gruesos, luego el cemento juntamente con el biocarbón y finalmente el agua. Es importante destacar que no se empleó ningún tipo de aditivo que pudiera alterar la mezcla. Además, el diseño de la mezcla se a cabo siguiendo los parámetros mostrados por el método ACI-211.

Tabla 4. Diseño de mezcla del concreto para 1 m³ de muestra patrón

Cemento (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (litros)
387	782	946	213.74
1	2.02	2.45	23.5 Lt/bls

Fuente: Elaboración propia

La dosificación para la mezcla que contiene biocarbón es la siguiente:

Tabla 5. Diseño de mezcla del concreto para 1 m³ de muestra con biocarbón de restos de madera

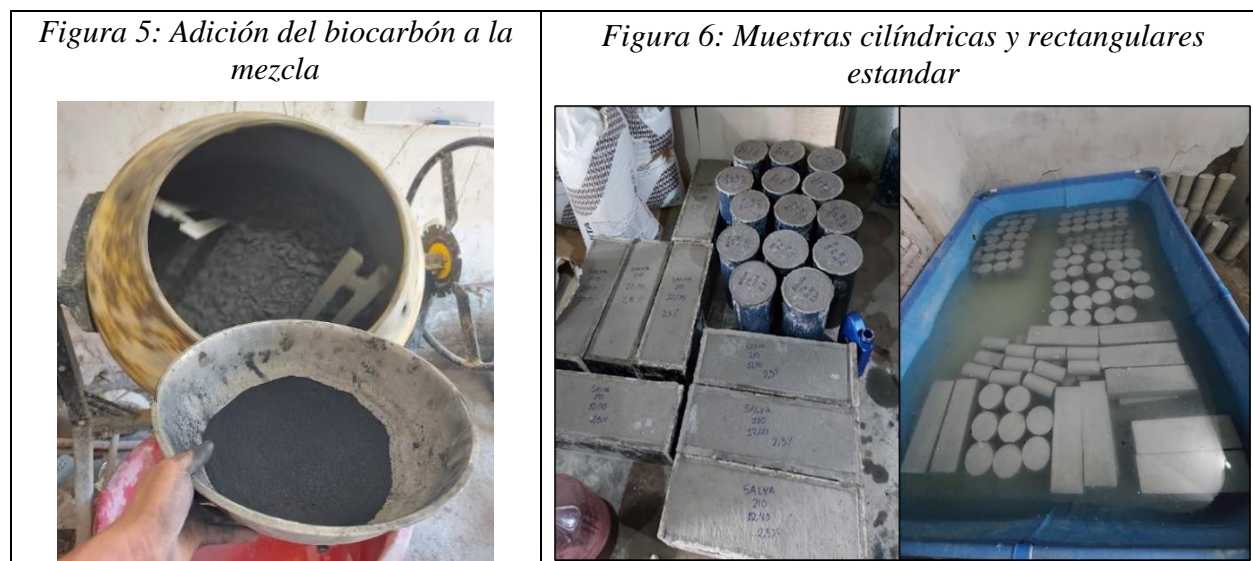
	Cemento (kg)	Biocarbón (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (litros)
Biocarbón	383	3.87	782	946	213.74
al 1%	0.99	0.01	2.02	2.45	23.5 Lt/bls
Biocarbón	379	7.73	782	946	213.74
al 2%	0.98	0.02	2.02	2.45	23.5 Lt/bls
Biocarbón	377	9.67	782	946	213.74
al 2.5%	0.975	0.025	2.02	2.45	23.5 Lt/bls

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

Las pruebas de resistencia a compresión fueron realizadas en 3 probetas por cada dosificación, con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm, estas dimensiones están bajo los lineamientos de la NTP 339.0.34 [26]. Y para las pruebas a flexión se realizaron con la NTP 339.078 [27].

En la Fig. 1 y Fig. 2 se observa la preparación de la mezcla de concreto junto con el biocarbón, además de los moldes cilíndricos y rectangulares.



Fuente: Elaboración propia

Agregado fino y Agregado grueso

Para esta investigación, se utilizaron agregados provenientes de dos canteras diferentes. El agregado fino se obtuvo de la cantera La Victoria – Pátapo mientras que el agregado grueso se extrajo de la cantera Tres Tomas. Ambas canteras se encuentran en la Ciudad de Chiclayo, Región Lambayeque, Perú.

En la tabla 1 se observan los resultados de las pruebas realizadas al agregado fino y agregado grueso:

Tabla 5: Características de los agregados

Descripción	A. Fino	A. Grueso	Und.
Peso específico de masa	2.691	2.65	g/cm ³
Peso unitario suelto	1527	1360	kg/m ³
Peso unitario compactado	1752	1576	kg/m ³
% de absorción	0.91	1.08	%
% de humedad	1.96	0.36	%
Módulo de fineza	2.87		
Tamaño máximo nominal		3/4"	Pulg.

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 7 y Fig. 8 se muestra la curva granulométrica del agregado grueso y agregado fino según la norma NTP 400.012 [28], cabe resaltar que las gráficas cumplen y están bajo los lineamientos de la norma del Perú.

Figura 7: Curva granulométrica del agregado grueso NTP 400.012

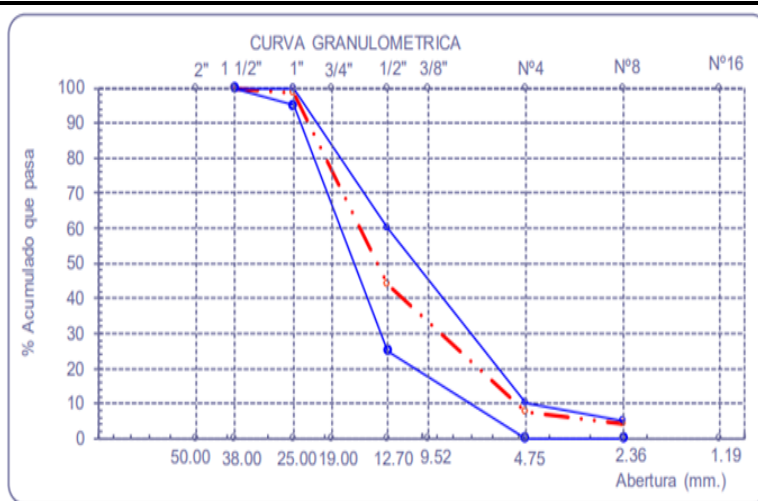
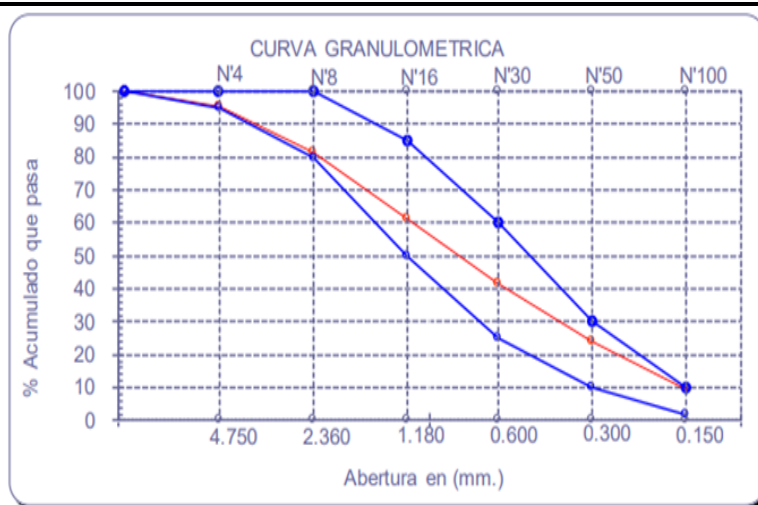


Figura 8: Curva granulométrica del agregado fino NTP 400.012



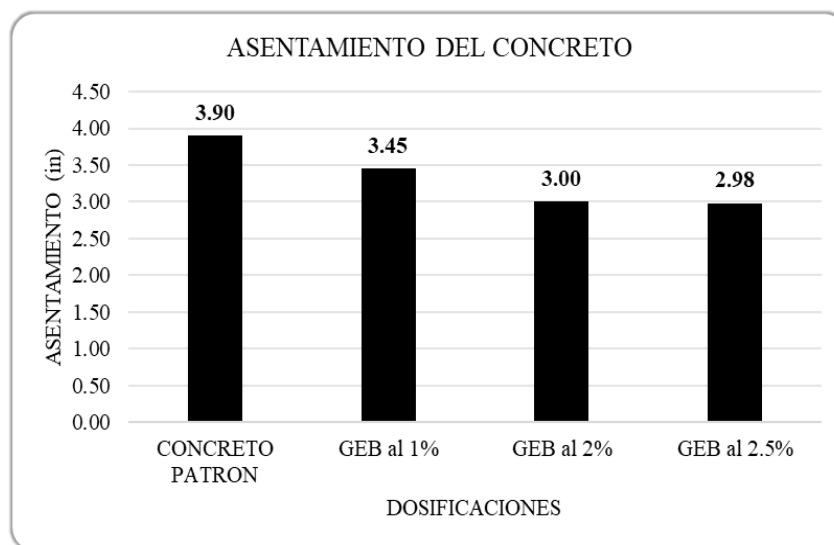
Fuente: Elaboración propia

Asentamiento del concreto

La prueba de asentamiento se realizó al concreto patrón y a los GEB (Grupos Experimentales con Biocarbón) en dosificaciones del 1%, 2% y 2%. Se determinó que existía una relación entre la cantidad de biocarbón y el acortamiento del slump, ya que mientras más era el porcentaje de biocarbón al reemplazar al cemento se notaba una mayor reducción del asentamiento.

Como se muestra en la Fig. 9, la dosificación más elevada de biocarbón fue del 2.5%, donde, este obtuvo un asentamiento de 2.98 in; al comparar con el asentamiento del concreto patrón se redujo en 0.92 in obteniendo el 24% de reducción. Esto confirma lo que menciona Roychand R. [18], la capacidad del biocarbón para absorber agua y su porosidad pueden tener un efecto positivo en las propiedades mecánicas de los materiales cementosos. De hecho, la incorporación de biocarbón en el concreto puede aumentar la viscosidad plástica del material, lo que puede resultar en una limitación en la trabajabilidad del concreto fresco. Esto ocurre ya que el biocarbón absorbe agua en sus poros, lo que reduce la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, esto a su vez, afecta la capacidad de flujo del concreto.

Figura 9: Asentamiento del concreto patrón y concreto con dosificaciones de biocarbón



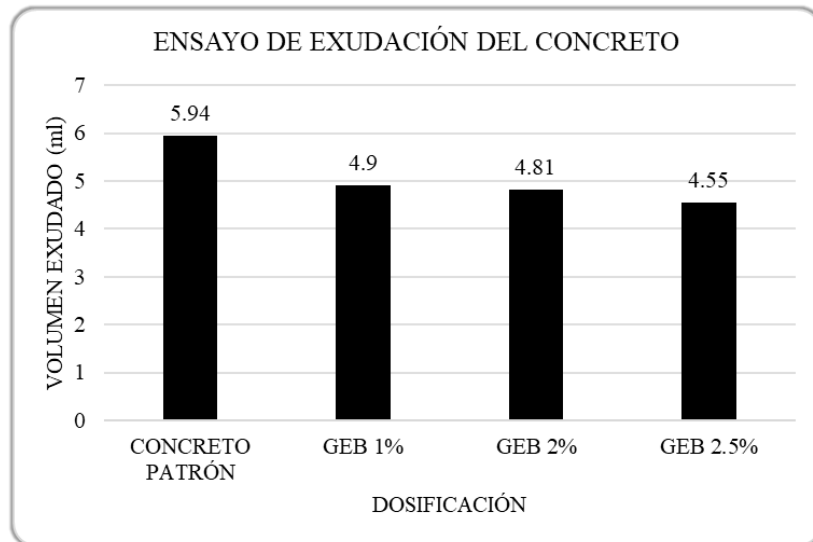
Fuente: Elaboración propia

Exudación del concreto

Del ensayo de exudación que se realizó a la mezcla patrón y a la mezcla que contenía distintos porcentajes de biocarbón, se observó que el volumen de agua que exudaba el concreto se iba reduciendo cada vez que se incrementaba el porcentaje de biocarbón, siendo el grupo experimental de biocarbón (GEB) al 2.5% la mezcla que menor agua exudó, de 4.55 ml, así como se muestra en la Fig. 10. La razón de disminuir la exudación cada vez más es debido al

biocarbon, ya que, al ser un material poroso, puede absorber agua y retenerla en la masa de concreto, lo que a su vez podría reducir la exudación. El ensayo se ejecutó con la NTP 339.077 [29].

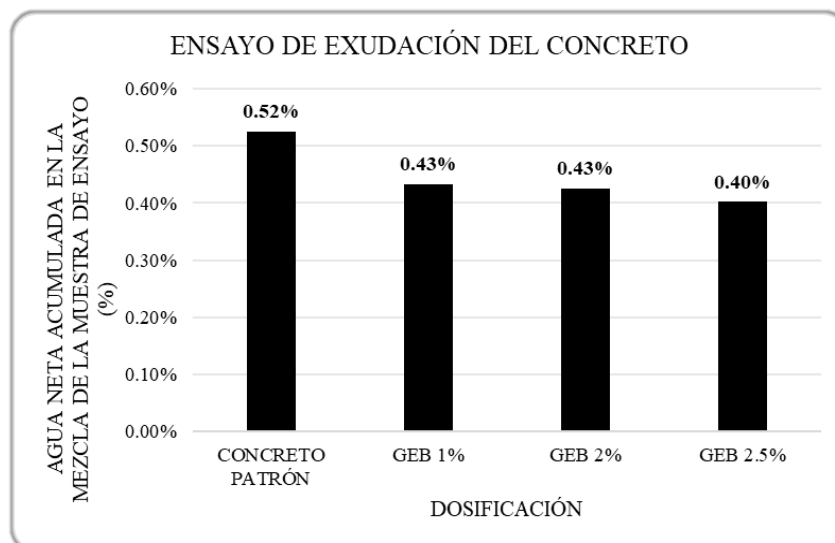
Figura 10: Resumen del volumen de exudación de la mezcla patrón y la mezcla con biocarbón.



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de agua neta acumulado en la mezcla de ensayo para la mezcla con distintas dosificaciones no fue elevado, debido a la finura del cemento empleado en esta investigación y a las propiedades porosas que presenta el biocarbón.

Figura 11: Resumen del porcentaje de agua neta acumulada de la mezcla patrón y la mezcla con biocarbón



Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas

Para las pruebas de compresión de probetas cilíndricas se realizaron dos tipos de curados, una fue en ambientes húmedos, en una piscina y también se evaluaron probetas curadas al aire libre, sin contacto con agua.

La resistencia a compresión de las probetas cilíndricas que fueron curadas en condiciones de curado húmedo se muestra en la Fig. 12, se ensayaron a los 7, 14, 28 y 56 días. La mayor resistencia a los 7 días fue del Grupo experimental con biocarbon (GEB) al 1%, la cual fue de 167.24 kg/cm^2 con un porcentaje de diseño del 79.64% y la muestra patrón tubo una resistencia de 151.03 kg/cm^2 teniendo un porcentaje de diseño del 71.92%, es decir tubo una mejora del 7.72%, teniendo en cuenta que nuestro diseño de mezcla es de 210 kg/cm^2 .

A los 14 días la muestra patrón con curado húmedo obtuvo una resistencia de 185.61 kg/cm^2 con un porcentaje de diseño del 88.39% y la dosificación sometida a curado húmedo que obtuvo un mejor resultado fue el Grupo Experimental con biocarbón (GEB) del 2%, con 195.34 kg/cm^2 manteniendo un porcentaje de diseño del 93.02%, es decir, el biocarbón al 2% mejoro un 4.63% con respecto a la muestra patrón.

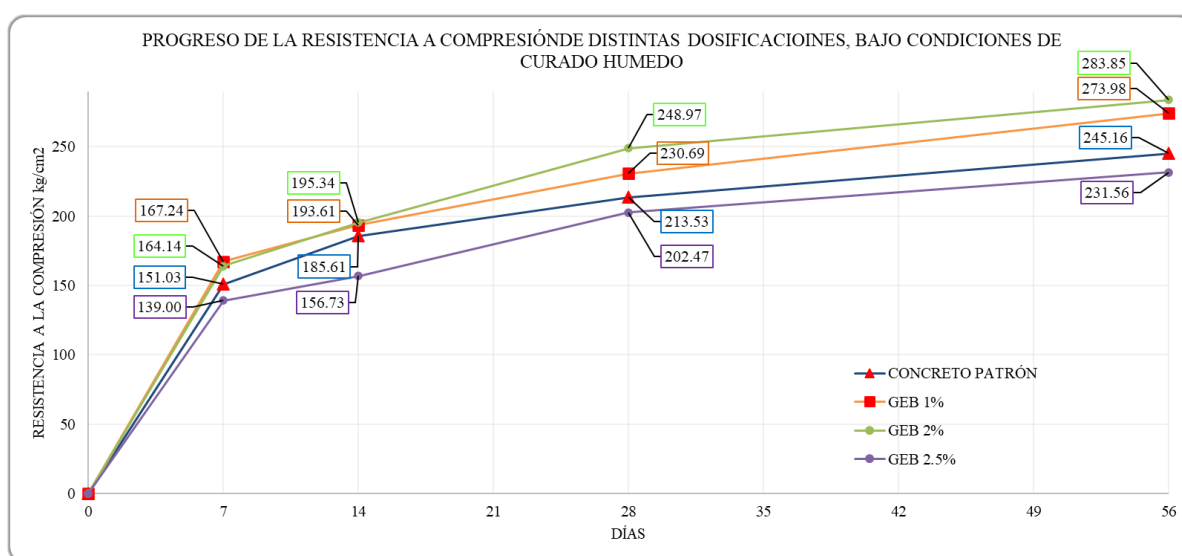
A la edad de 28 días el grupo de control y el Grupo Experimental con biocarbón (GEB) del 2%, ambos sometidos a curado húmedo, arrojaron una resistencia a compresión de 213.53 kg/cm^2 y 248.97 kg/cm^2 respectivamente. Igualmente se determinó su porcentaje de diseño del 101.68% de la muestra patrón y 118.56% de la muestra con biocarbón al 2%, determinando así una mejora del 16.88%.

Finalmente, los ensayos realizados a los 56 días arrojaron una resistencia de 245.16 kg/cm^2 con su porcentaje de diseño del 116.74% para la muestra patrón y para dosificación con mayor resistencia fue la del 2% con 283.85 kg/cm^2 con su porcentaje de diseño del 135.17%, determinando así una mejora del 18.43% respecto a la muestra patrón. Es decir que el biocarbón con un porcentaje del 2% en peso si mejora la propiedad de compresión del concreto.

En resumen, la resistencia compresiva del concreto con biocarbón de restos de madera (Molle costeño, molle serrano, árbol de meijo, árbol de ficus y árbol de tulipan) sometido a curado húmedo ha mejorado notoriamente, especialmente la dosificación con 2%. Según Dilshad A. [19], crece la resistencia a compresión del concreto con el 3% de biocarbón de aserrín; y según los resultados anteriores se puede confirmar que el biocarbón realmente mejora la propiedad de resistencia del concreto. Además, los datos muestran que la resistencia a la compresión del concreto aumenta a medida que transcurre el tiempo, puesto que las pruebas realizadas a los 28 y 56 días mostraron un crecimiento en la resistencia a la compresión en

comparación con los resultados obtenidos a los 7 días, esto se debe a la propiedad absorbente del biocarbon al contener el agua y con el tiempo seguir curando el concreto. Los hallazgos están conformes con investigaciones anteriores pues mostraron que el uso de biocarbono mejora las propiedades mecánicas del concreto. Se ha propuesto que la presencia de biocarbono puede mejorar la cohesión y densidad del hormigón, lo que puede resultar en una mayor resistencia a la compresión. Así mismo, Roychand et al., menciona que el incremento de la resistencia a compresión se atribuye el aumento en la reacción de hidratación, las buenas conexiones entre la matriz del cemento, el biocarbón y el curado interno proporcionado por el agua almacenada en la microestructura porosa del concreto con biocarbón [30].

Figura 12: Resistencia a la compresión del concreto sometido a curado húmedo

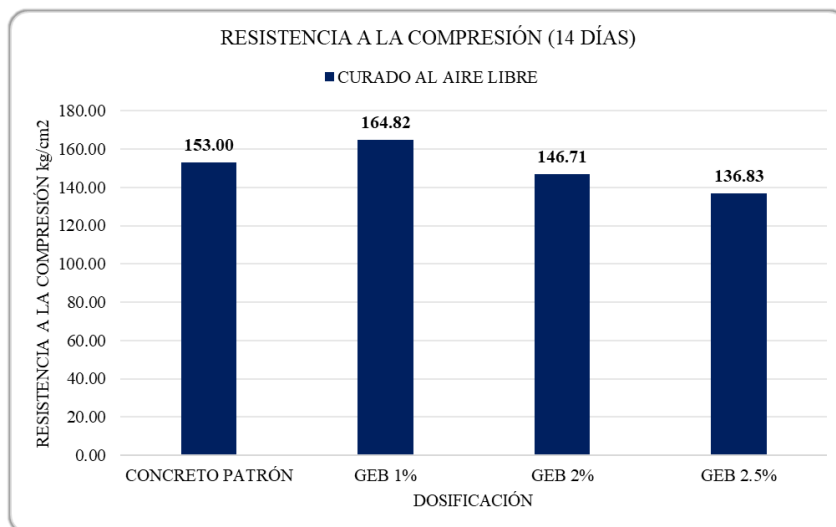


Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los resultados de compresión del concreto con curado al aire libre fueron ensayadas a los 14 y 28 días. La consideración de este tipo de curado se debe a la capacidad de absorción del biocarbón debido a las propiedades porosas de este material, por lo tanto, se esperó que la resistencia de estas probetas con curado al aire libre sea similares o mejoradas a las muestras del concreto patrón, cabe resaltar que no se usó ningún tipo de aditivo que pueda ayudar en el aumento de las propiedades del concreto, sin embargo, en la Fig. 13 y Fig. 14 se muestra que obtuvieron una menor resistencia a la de nuestro diseño de mezcla, la cual es de 210 kg/cm². Esto puede deberse a muchos factores, en primer lugar, es importante considerar que el curado al aire libre puede afectar significativamente la resistencia del concreto debido a las fluctuaciones de temperatura y humedad. El concreto necesita una cantidad adecuada de humedad para desarrollar su resistencia, y el curado al aire libre puede dificultar el mantenimiento de la humedad óptima. Además, el biocarbón también puede afectar la

resistencia del concreto por su porosidad y capacidad de absorción de agua. El exceso de porosidad en el biocarbón podría limitar la capacidad del concreto para alcanzar su máxima resistencia debido al acortamiento en la cantidad de agua disponible para hidratar el cemento.

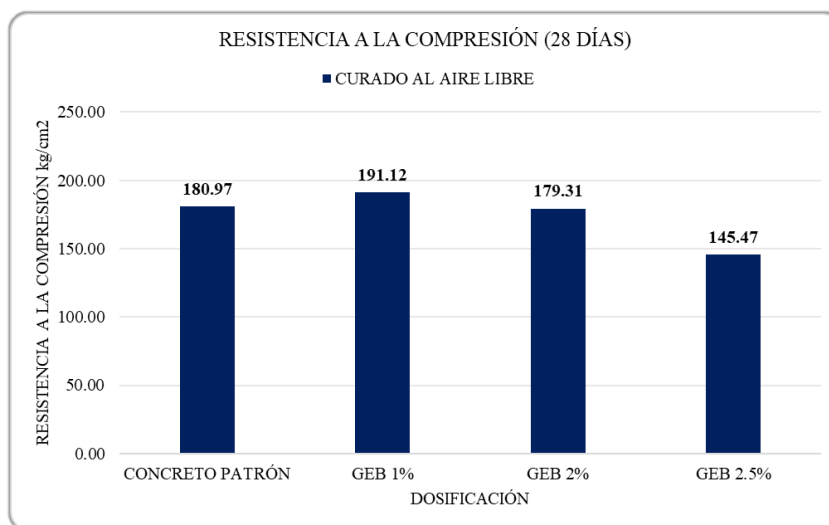
Figura 13: Resistencia a la compresión a los 14 días con curado al aire libre



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Fig. 13 la resistencia a compresión sometido a curado al aire libre del grupo de control fue de 153 kg/cm² con un porcentaje de diseño del 72.86% y el GEB al 1% fue de 164.82 kg/cm² con porcentaje de diseño del 78.49%. los resultados a los 14 días muestran que la dosificación con biocarbón supero ligeramente a la muestra patrón con una mejora del 5.63%. Esto se debe al pequeño porcentaje de biocarbón usado, aumento la resistencia un poco por la absorción del agua del diseño de mezcla y la absorción de las moléculas de agua presentes en la atmosfera, sin embargo, al reemplazar más cantidades de biocarbón la resistencia disminuye.

Figura 14: Resistencia a la compresión a los 28 días con curado al aire libre.



Fuente: Elaboración propia

A los 28 días la resistencia sometida a curado al aire libre no llegó a la resistencia requerida que es de 210 kg/cm^2 . En la Fig. 14 se observa que la resistencia de la muestra patrón es de 180.97 kg/cm^2 con porcentaje de diseño del 86.18% y la dosificación que superó a la muestra patrón fue el GEB al 1% con 191.12 kg/cm^2 con porcentaje de diseño del 91.01%.

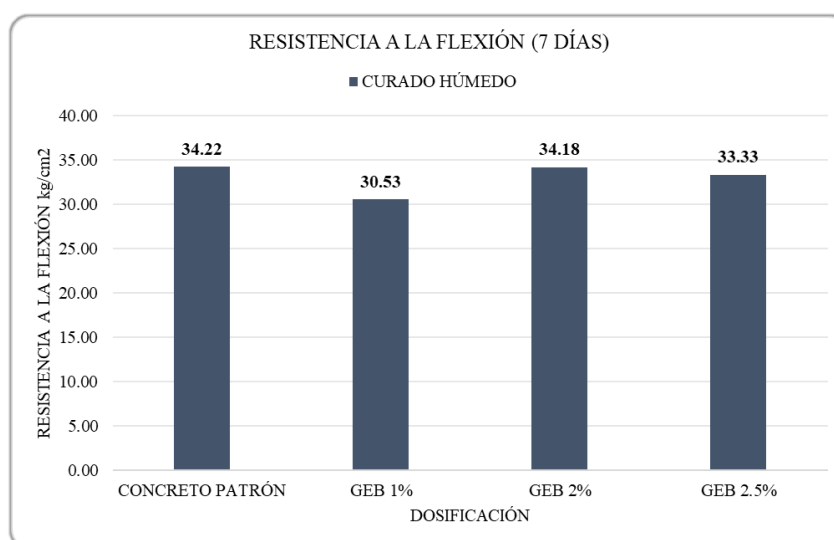
En definitiva, la resistencia a compresión del concreto con el método de curado al aire libre utilizando biocarbón sí mejora la resistencia con respecto a la muestra patrón, sin embargo, es necesario curar el concreto en condiciones húmedas para que se logre llegar a la resistencia solicitada por el diseño ($f'c \text{ } 210 \text{ kg/cm}^2$).

Resistencia a la flexión

Para el ensayo de resistencia a flexión, se está realizando dos tipos de vigas, un tipo que estará sometido a condiciones de curado húmedo (en una piscina) y el otro tipo de viga que estará sometida a condiciones de curado al aire libre. Se realizó esto con el fin de determinar y comparar que tipo de curado nos proporciona un mejor resultado.

En la Fig. 15 se muestra los resultados obtenidos de la resistencia a flexión a la edad de 7 días el concreto patrón obtuvo un módulo de rotura promedio de 34.22 kg/cm^2 y la dosificación que obtuvo un módulo de rotura cercano al concreto patrón fue el Grupo Experimental con biocarbón (GEB) del 2%, con 34.18 kg/cm^2 .

Figura 15: Resultados del ensayo de flexión a los 7 días

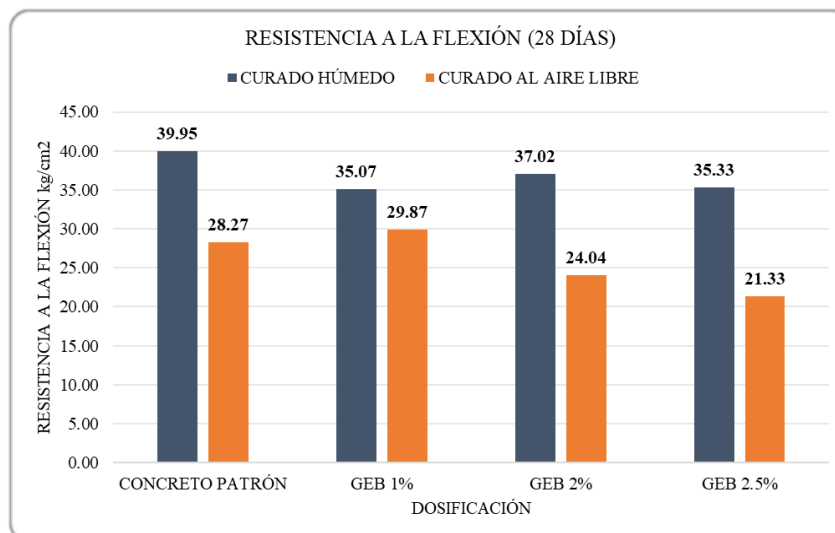


Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 16 a los 28 días el grupo de control con curado húmedo consiguió un módulo de rotura promedio de 39.95 kg/cm^2 y la dosificación sometida a curado húmedo que obtuvo un similar al concreto patrón fue el Grupo Experimental con biocarbón (GEB) del 2%, con 37.02

kg/cm². Por otro lado, el concreto patrón que fue expuesto a un curado al aire libre alcanzo un módulo de rotura promedio de 28.27 kg/cm² y la dosificación que supero al concreto patrón fue el GEB al 1%, con 29.87 kg/cm².

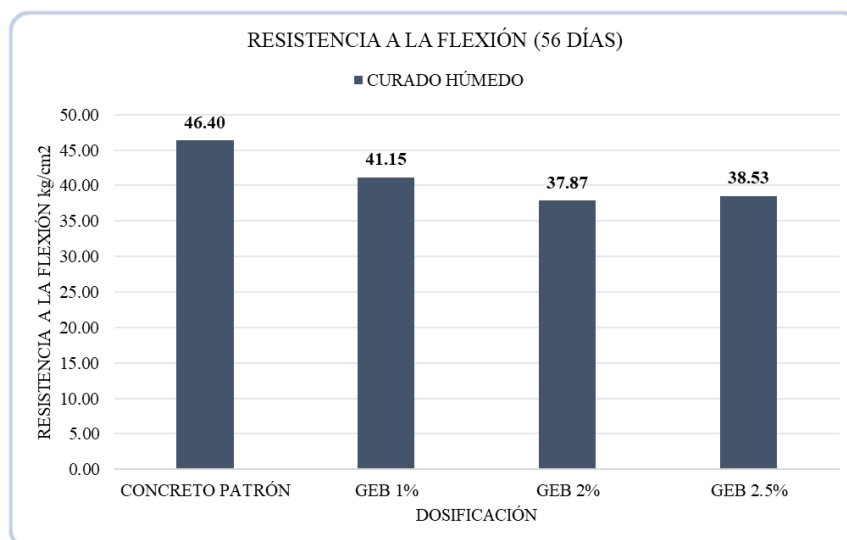
Figura 16: Resultados del ensayo de flexión a los 28 días



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 17 a los 56 días el concreto patrón con curado húmedo obtuvo un módulo de rotura promedio de 46.40 kg/cm² y la dosificación que se acercó al concreto patrón fue el Grupo Experimental con biocarbón (GEB) del 1%, con 41.15 kg/cm².

Figura 17: Resultados del ensayo de flexión a los 56 días.



Fuente: Elaboración propia

En resumen, el concreto con biocarbón tiene menos resistencia a la flexión que el grupo de control, esto podría deberse a una serie de factores. Esto puede deberse al reemplazo de cemento que se realizó por biocarbón a la mezcla, esta acción puede haber cambiado la forma

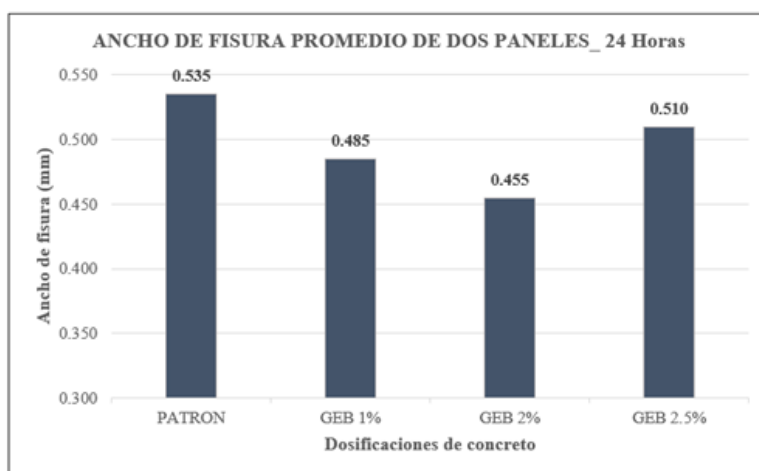
en que se distribuyó el tamaño de los poros en la matriz del concreto, lo que, a su vez, puede haber cambiado la flexibilidad del material. De acuerdo con lo investigado por Alice S. [31], usó biocarbón de astillas de madera y ensayo la resistencia a flexión con distintas dosificaciones, una de ellas fue adicionar el 2% de biocarbón a su mezcla y otra fue de reemplazar el 2% de cemento por biocarbón, arrojándole que al adicionar biocarbón aumento el módulo de rotura un 15%, sin embargo, cuando sustituye un porcentaje de cemento por biocarbón el módulo de rotura disminuye en comparación con su muestra patrón. Es decir que el biocarbón si mejora la resistencia a flexión del concreto, pero adicionando biocarbón, y disminuye al tratar de reemplazar el cemento por biocarbon. Sin embargo, la resistencia no ha disminuido demasiado, por lo que también puede solucionarse al realizar otras dosificaciones con otros diseños de mezcla.

Fisuración del concreto

Con respecto a la fisuración por retracción plástica, el concreto patrón arrojó un ancho de fisura de 0.535 mm, siendo la dosificación del grupo experimental de biocarbón del 2% que se comportó mejor ya que se fisuro menos; incluso las otras dosificaciones se comportaron mejor que la muestra patrón.

Según Barissov et al. (2021) [32], se ha observado que el biocarbón no solo mejora la resistencia del concreto, sino que también incrementa la energía de fractura, es decir, la resistencia a la propagación de grietas. Este fenómeno puede explicarse por el hecho de que la incorporación de partículas finas de biocarbón en la matriz del concreto modifica el mecanismo de propagación de las grietas.

Figura 18: Ancho promedio de fisuras



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

- Los resultados obtenidos permiten llegar a la conclusión de que el uso de biocarbón derivado de restos de madera contribuye a disminuir el asentamiento del concreto durante su estado fresco. Esta reducción puede ser atribuida a la mayor superficie específica del biocarbón, lo que aporta a una mayor absorción de agua en la mezcla y tener una estructura más compacta. Además, el biocarbón también actúa como un agente estabilizante al mejorar la cohesión de la mezcla, lo que disminuye la tendencia a la segregación y el sangrado. Por ende, la exudación del concreto también ha disminuido gracias a la absorción del agua que proporciona el biocarbón.
- A los 7 días la resistencia a compresión del concreto con biocarbón bajo condiciones de curado húmedo arrojó que la dosificación del 1% superó a la muestra patrón un 7.72%. A los 14 días la dosificación con 2% de biocarbón mejoró la resistencia a la compresión un 4.63% con respecto a la muestra patrón. A los 28 días y 56 días la resistencia a la compresión del concreto con biocarbón del 2% en peso, mejoró considerablemente un 16.88% y 18.43%, respectivamente. Es decir que el porcentaje óptimo que aumente la característica de resistencia a compresión del concreto es del 2% de biocarbón. Además, se concluye que a largo plazo la resistencia sigue aumentando, esto es gracias a las propiedades de absorción del concreto, ya que el concreto se va a seguir curando, por ende, continuará aumentando su resistencia. Cabe recalcar que al aumentar la adición de biocarbón la resistencia disminuirá, arrojándonos datos menores que la muestra patrón.
- La resistencia a compresión de las probetas de concreto adicionado biocarbón bajo curado de condiciones al aire libre a los 14 y 28 días sí mejoraron la resistencia con respecto a la muestra patrón un 5.63% y 10.15% respectivamente. Sin embargo, no llegaron a la resistencia de diseño la cual fue de f'_c 210 kg/cm². Es decir, el curado al aire libre mejora la resistencia a comparación de la muestra patrón, pero no supera a la resistencia requerida como el método de curado húmedo.
- Los resultados experimentales indicaron que la incorporación de biocarbón de restos de madera no tuvo un impacto significativo en el desarrollo de la resistencia a flexión del concreto. Esto puede deberse al reemplazo de cemento que se realizó por biocarbón a la mezcla, esta acción puede haber cambiado la forma en que se distribuyó el tamaño de los poros en la matriz del concreto, lo que, a su vez, puede haber cambiado la flexibilidad del material. Además, puede que otra materia orgánica convertida en biocarbón puede ser mejor opción para la mejora de la resistencia a flexión.

- La sustitución parcial de partículas de biocarbón por cemento portland tipo I, mejora a comparación del concreto patrón, la dosificación del 2% incremento su energía de fractura mucho más que la muestra patrón.

Recomendaciones

- El biocarbón puede mejorar significativamente la resistencia a la compresión del concreto, pero la dosis óptima depende de varios factores, como el tamaño de las partículas, la velocidad de la pirolisis y la densidad de empaquetamiento, por lo tanto, se recomienda más investigaciones con otras materias orgánicas pasando por el proceso de pirolisis y transformándolo en biocarbón, puesto que, cada materia orgánica puede tener distintos compuestos químicos, llegando a ser más compatibles con las propiedades del cemento.
- Se recomienda optar por otros diseños de mezcla para aumentar las características de flexión del concreto, variando la relación agua cemento y mejorando la trabajabilidad de este.
- Para tener una seguridad en el aumento de las propiedades del concreto con biocarbón se recomienda incorporar algún tipo de aditivo que pueda ser compatible con las propiedades del biocarbón hacia el concreto.

Referencias

- [1] M. Turovaara, “The effect of high-ratio biochar replacement in concrete on performance properties-Experimental study of biochar addition to concrete mixture.”
- [2] S. Gupta, H. W. Kua, and C. Y. Low, “Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar,” *Cem Concr Compos*, vol. 87, pp. 110–129, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.12.009.
- [3] “Cement – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/reports/cement> (accessed May 15, 2023).
- [4] D. L. Summerbell, C. Y. Barlow, and J. M. Cullen, “Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study,” *J Clean Prod*, vol. 135, pp. 1327–1339, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.06.155.
- [5] D. B. Müller *et al.*, “Carbon emissions of infrastructure development,” *Environ Sci Technol*, vol. 47, no. 20, pp. 11739–11746, Oct. 2013, doi: 10.1021/ES402618M/SUPPL_FILE/ES402618M_SI_002.XLSX.
- [6] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry,” *Cem Concr Res*, vol. 114, pp. 2–26, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015.
- [7] J. Lehmann, J. Gaunt, and M. Rondon, “Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, no. 2, pp. 403–427, Mar. 2006. doi: 10.1007/s11027-005-9006-5.
- [8] S. Jeffery, F. G. A. Verheijen, M. van der Velde, and A. C. Bastos, “A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis,” *Agric Ecosyst Environ*, vol. 144, no. 1, pp. 175–187, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.AGEE.2011.08.015.
- [9] A. Mobili *et al.*, “Biochar and recycled carbon fibres as additions for low-resistive cement-based composites exposed to accelerated degradation,” *Constr Build Mater*, vol. 376, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131051.
- [10] F. Li *et al.*, “Bioresource Upgrade for Sustainable Energy, Environment, and Biomedicine,” *Nanomicro Lett*, vol. 15, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1007/S40820-022-00993-4.
- [11] M. Xu *et al.*, “From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting,” *Environ Res*, vol. 229, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.ENVRES.2023.115977.

- [12] M. Vochozka, A. Maroušková, J. Váchal, and J. Straková, “Biochar pricing hampers biochar farming”, doi: 10.1007/s10098-016-1113-3.
- [13] A. Akhtar and A. K. Sarmah, “Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties,” *Science of The Total Environment*, vol. 616–617, pp. 408–416, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.319.
- [14] S. Gupta, H. W. Kua, and S. D. Pang, “Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature,” *Constr Build Mater*, vol. 234, p. 117338, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117338.
- [15] M. Haris Javed, M. Ali Sikandar, W. Ahmad, M. Tariq Bashir, R. Alrowais, and M. Bilal Wadud, “Effect of various biochars on physical, mechanical, and microstructural characteristics of cement pastes and mortars,” *Journal of Building Engineering*, vol. 57, p. 104850, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104850.
- [16] S. Gupta and H. W. Kua, “Factors Determining the Potential of Biochar As a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 9, p. 04017086, Apr. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001924.
- [17] N. Song, Z. Li, S. Wang, and G. Li, “Biochar as internal curing material to prepare foamed concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 377, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131030.
- [18] R. Roychand *et al.*, “Carbon sequestration from waste and carbon dioxide mineralisation in concrete – A stronger, sustainable and eco-friendly solution to support circular economy,” *Constr Build Mater*, vol. 379, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131221.
- [19] D. Ali *et al.*, “Thermo-physical properties and microstructural behaviour of biochar-incorporated cementitious material,” *Journal of Building Engineering*, vol. 64, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.job.2022.105695.
- [20] S. Gupta and H. W. Kua, “Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar,” *Constr Build Mater*, vol. 159, pp. 107–125, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095.
- [21] M. Joel, “Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies Use of Crushed Granite Fine as Replacement to River Sand in Concrete Production”, Accessed: May 18, 2023. [Online]. Available: <http://lejpt.academicdirect.orghttp://creativecommons.org/licenses/by/3.0/.85>

- [22] A. V. Bridgwater, “Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading,” *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2011.01.048.
- [23] T. Barissov, “Application of Biochar as Beneficial Additive in Concrete,” 2021. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/civilengdiss/175>
- [24] J. Lehmann and S. Joseph, “Biochar for environmental management: Science and technology,” *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, pp. 1–416, Jan. 2012, doi: 10.4324/9781849770552.
- [25] “Tipos de concreto y sus usos | Construyendo Seguro.” <https://www.construyendoseguro.com/los-tipos-de-concreto-y-sus-usos/> (accessed May 18, 2023).
- [26] “NTP 339.034 ‘CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas.’” May 2015.
- [27] “NTP 339.078 ‘CONCRETO. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo.’” May 2012.
- [28] “NTP 400.012 ‘AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.’” May 2013.
- [29] “NTP 339.077: ‘CONCRETO. Métodos de ensayo normalizados para exudación del concreto.’” <https://pdfcoffee.com/3390772013exudacion-2-pdf-free.html> (accessed May 17, 2023).
- [30] R. Roychand *et al.*, “Carbon sequestration from waste and carbon dioxide mineralisation in concrete – A stronger, sustainable and eco-friendly solution to support circular economy,” *Constr Build Mater*, vol. 379, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131221.
- [31] A. Sirico *et al.*, “Biochar-based cement pastes and mortars with enhanced mechanical properties,” *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 14, no. 54, pp. 297–316, Oct. 2020, doi: 10.3221/IGF-ESIS.54.21.
- [32] T. Barissov, “Application of Biochar as Beneficial Additive in Concrete,” 2021. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/civilengdiss/175>